



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Implementação de um Filtro Activo de Potência para Optimização da Interface entre a Rede e outros Sistemas Eléctricos

Estudo e Desenvolvimento de Filtros Activos de Potência do Tipo Série com Sistema de Controlo Implementado em Computador Pessoal

Manuel João Sepúlveda Mesquita de Freitas

Tese submetida na Universidade do Minho
para a obtenção do grau de
Doutor em
Engenharia Electrónica Industrial

Projecto financiado pelo PRODEP



Guimarães 2004

Resumo

O uso intensivo de conversores electrónicos de potência e de outras cargas não lineares, tais como equipamentos electrónicos e iluminação com lâmpadas de descarga em meio gasoso, tanto na indústria como nos outros consumidores em geral, é responsável por um aumento na deterioração das formas de onda de corrente e tensão nos sistemas eléctricos.

A presença de harmónicos nas linhas eléctricas causa não só maiores perdas no sistema de distribuição de energia, como também problemas de interferências nos sistemas de comunicações, operação indevida de sistemas de protecção, e por vezes, deficiências no funcionamento de equipamentos electrónicos, que são cada vez mais sensíveis, pois incluem sistemas de controlo baseados em microelectrónica, que operam com níveis de energia muito baixos. Os efeitos a longo prazo são basicamente, sobreaquecimento e envelhecimento prematuro dos dispositivos eléctricos e a fadiga mecânica das máquinas eléctricas.

Os filtros passivos podem ser utilizados para compensar diversos problemas de qualidade de energia, mas apenas resolvem os problemas para as frequências que são sintonizados. Além disso, a sua operação não pode ser limitada a uma determinada zona da rede eléctrica e os fenómenos de ressonância não podem ser totalmente prevenidos.

Os filtros activos são dispositivos electrónicos de potência que não apresentam as desvantagens dos filtros passivos, podendo compensar alguns dos problemas relacionados com a tensão e a corrente, nomeadamente: falhas de curta duração, distorção da corrente ou tensão causada por harmónicos, desequilíbrio de correntes ou tensões em sistemas trifásicos, flutuação (subharmónicos), sobretensões e subtensões momentâneas, e podem também fazer a correcção do factor de potência. Existem fundamentalmente dois tipos de filtros activos: o filtro activo paralelo, para filtragem das correntes nas linhas; e o filtro activo série, para filtragem das tensões de alimentação.

Os algoritmos de controlo baseados na teoria p-q podem ser utilizados de forma simples e eficaz no controlo de filtros activos. Os cálculos são feitos no domínio dos tempos, com valores instantâneos de tensões e correntes, e são relativamente simples.

No caso da compensação de tensão com um filtro activo série, é também possível utilizar em alternativa, algoritmos baseados no controlo clássico (por exemplo, controlo proporcional + integral), pois os sinais de referência são conhecidos.

O objectivo principal desta tese consistiu no estudo, simulação, desenvolvimento, e teste de um filtro activo série com sistema de controlo implementado num computador pessoal (PC) munido de uma placa de aquisição de dados genérica para o barramento PCI. Esta opção justifica-se devido ao baixo custo, elevada capacidade de processamento, versatilidade e pelas inúmeras possibilidades oferecidas por um sistema de controlo baseado em computador pessoal.

O controlo do filtro activo série é um tipo de aplicação que requer um controlador rápido, que não perca amostras, e no qual os intervalos de tempo de resposta máximos permitidos sejam garantidos. Estas características implicam a necessidade de um sistema de controlo em tempo real (*hard real time*, na literatura inglesa).

A implementação do circuito de controlo baseada em PC apresenta algumas dificuldades. Os maiores problemas estão relacionados com os sistemas operativos multitarefa vulgares, podendo ser resolvidos apenas por programadores de nível muito avançado. Outro problema é o lento sistema de entrada/saída de dados. Estas placas são ligadas ao barramento PCI, logo não tiram partido de toda a velocidade do processador, sendo normalmente concebidas para monitorização e controlo de processos. Desse modo, são muito limitadas no tocante ao controlo em tempo real, e além disso, os fabricantes ainda não disponibilizam soluções de baixo custo para execução desse tipo de controlo implementado em PC.

Habitualmente é necessário fazer a sincronização dos filtros activos de potência com os sinais distorcidos presentes na rede eléctrica. Os circuitos mais simples, como o detector de passagem por zero podem falhar com facilidade, sendo necessário recorrer a circuitos mais robustos. Discutem-se aqui duas soluções possíveis: o circuito *Phase Locked Loop* e o Filtro Vectorial Adaptativo.

Nesta tese apresentam-se também resultados de simulações e experimentais dos controladores desenvolvidos, e dos filtros activos de potência. Além disso é feita uma comparação com uma implementação baseada em microcontrolador.

Palavras Chave — *Aquisição de Dados, Compensação de Harmónicos, Controlador Implementado em Computador Pessoal, Controlo Digital, Controlo em Tempo Real, Filtro Activo Série, Filtros Activos de Potência, Qualidade de Energia Eléctrica, Teoria p-q, Simulações de Sistemas de Potência.*

Abstract

The intensive use of power converters and other non-linear loads, such as electronic equipments and discharge lamps, in industry and by consumers in general, is responsible for an increase in the deterioration of the power systems current and voltage waveforms.

The presence of harmonics in the power lines results in greater power losses in the distribution system, interference problems in communication systems, faulty operation of protection devices, and sometimes, in operation failures of electronic equipments, which are more and more sensitive since they include microelectronic control systems, which work with very low energy levels. In the long run the effects are, basically, overheating and premature aging of electric devices and mechanical fatigue of electrical machines.

Passive filters can be used to compensate some power quality problems, but they only solve the problems for the frequencies they were tuned for. Besides, their operation cannot be limited to a certain zone, and resonances cannot be fully prevented.

Active power filters are power electronic devices which do not have the disadvantages of passive filters and are able to compensate some voltage and current related problems, namely: short outages, current or voltage distortion due to harmonics, current or voltage unbalance in three-phase systems, flicker (subharmonics), momentary overvoltages or undervoltages, and they can also correct power factor. There are basically two types of active filters: the shunt active filter, to filter line currents; and the series active filter, to filter mains voltages.

The control algorithms based on the p-q theory may be easily and efficiently used for controlling active filters. The calculations are done in the time domain, with instantaneous values of voltages and currents, and are relatively simple.

If the voltages are being compensated with a series active filter, it is also possible to efficiently use a classical control approach (for example, proportional + integral control), because the reference signals are known.

The main objective of this thesis was to study, simulate, develop, and test a series active filter with a control system implemented in a personal computer (PC), using a standard multifunction data acquisition PCI bus card. This option is justified by its relative low cost, high processing capability, versatility, and because of the numerous possibilities offered by such a computer-based system.

The control of a series active filter is a type of application which requires a fast controller, which does not lose samples, and where all the maximum allowed deadlines must be met each and every time. These characteristics imply that this application needs a *hard real-time* control system.

A PC implemented controller presents some difficulties. The main problems are related to the standard multitasking operating systems, and can only be solved by very skilled programmers. Another problem is the slow data input/output system. These boards are connected to the PCI bus and do not take advantage of the full processor speed. They are usually designed to acquire data for monitoring purposes or process control. Thus, they are very limited when performing hard real-time control, and besides, hardware manufacturers do not provide low cost solutions to perform PC based hard real-time control, yet.

Usually, it is necessary to synchronize the active power filters with the mains distorted electric signals. Simple circuits like zero crossing detectors may easily fail in performing this task, so it is necessary to use more robust circuits. Two possible solutions are discussed here: the Phase Locked Loop and the Vector Adaptive Filter.

In this thesis, simulated and experimental results of the developed controllers and active power filters are also presented. Furthermore, a comparison with a microcontroller based implementation is made.

Keywords — *Active Power Filters, Data Acquisition, Digital Control, Harmonics Compensation, p-q Theory, Personal Computer Implemented Controller, Power Quality, Power Systems Simulations, Real-time Control, Series Active Filter.*

Agradecimentos

Desejo agradecer aos meus orientadores de doutoramento Dr. Júlio Manuel de Sousa Barreiros Martins e Dr. João Luiz Afonso pela ajuda, incentivo e sugestões ao longo de todo este trabalho.

Aos meus colegas Dr. Adriano José da Conceição Tavares e Dr. Carlos Alberto Baptista da Silva, que negligenciando muitas vezes os seus afazeres, deram um contributo desinteressado e imprescindível na realização deste trabalho.

À Dra. Estela Guerreiro G. S. Bicho Erllhagen e Dra. Filomena M. R. M. O. Soares, ao Eng. João António S. Noivo, Eng. João Miguel C. Sena Esteves e Eng. Paulo Francisco S. Cardoso, pelo seu apoio e amizade.

A todos os meus colegas que me incentivaram durante o trabalho, dos quais posso salientar o Dr. Jaime Francisco Cruz Fonseca e Dr. José de Araújo Mendes, ao Professor João Luís M. P. Monteiro e ao Professor Carlos Alberto Caridade Monteiro e Couto.

Agradeço aos engenheiros Ricardo Pregitzer e Tiago Sousa as suas contribuições no trabalho desenvolvido.

Quero agradecer também a todos os meus colegas que ficaram sobrecarregados com actividades lectivas e de gestão, possibilitando a minha “ausência”, sem a qual este trabalho não teria sido possível.

Aos técnicos do Departamento de Electrónica Industrial Carlos Manuel A. Torres e Joel Lopes F. Almeida pela sua pronta disponibilidade e boa vontade na construção de alguns equipamentos necessários ao trabalho, e ao Eng. Manuel José C. Romero pela sua colaboração e empenho na aquisição de materiais e equipamentos.

Às secretárias do Departamento de Electrónica Industrial Teresa de Jesus Gomes Peixoto e Maria Beatriz Oliveira Dias Antunes, e à secretária do Centro Algoritmi Ana Paula Graça pela simpatia e ajuda em diversas tarefas relacionadas com o meu trabalho.

Quero agradecer especialmente a toda a instituição Universidade do Minho, que me acolheu e me possibilitou a execução deste trabalho.

Quero agradecer também à minha família, especialmente aos meus pais e à Ercília, que sempre me apoiaram, incentivaram e pacientemente me “aturaram” nos momentos mais difíceis (e que foram muitos...) e também à Inês, que apesar da sua pouca idade, sempre se comportou bem.

Índice

1 – Introdução.....	1
1.1 – Motivações do Trabalho.....	1
1.2 – Objectivos da Tese.....	4
1.3 – Qualidade de Energia Eléctrica.....	5
1.3.1 – Cargas Não Lineares.....	6
1.3.2 – Efeitos dos Harmónicos.....	9
1.3.3 – Limitações dos Filtros Passivos.....	10
1.3.4 – Vantagens dos Filtros Activos de Potência.....	10
1.4 – Organização da Tese.....	11
2 – Filtros Activos de Potência.....	13
2.1 – Introdução.....	13
2.2 – O Andar de Potência.....	13
2.2.1 – Filtro Activo de Potência Paralelo.....	14
2.2.2 – Filtro Activo de Potência Série.....	17
2.2.3 – Condicionador de Qualidade de Energia Unificado.....	20
2.3 – O Sistema de Controlo.....	21
2.4 – A Teoria p-q.....	22
2.4.1 – Significado Físico das Grandezas da Teoria p-q.....	24
2.4.2 – Controlo de Filtros Activos de Potência Baseado na Teoria p-q.....	25
2.4.3 – Componentes Simétricas.....	28
2.5 – Diversas Topologias e Formas de Controlo de Filtros Activos.....	30
2.6 – Conclusão.....	39
3 – Simulação de Sistemas de Controlo do Filtro Activo Série em Várias Condições de Operação...41	
3.1 – Introdução.....	41
3.2 – Exemplo de Carga Causadora de Distorção na Tensão.....	42
3.3 – Teoria p-q Aplicada ao Controlo do Filtro Activo Série.....	43
3.3.1 – Caso da Potência Constante na Carga.....	44
3.3.2 – Caso das Tensões Sinusoidais na Carga.....	47
3.4 – Modelo para Determinar as Componentes Simétricas do Sistema Trifásico.....	50
3.5 – Simulação do Filtro Activo Série.....	54
3.5.1 – Filtro Activo e Carga Linear Trifásica Equilibrada – <i>configuração a</i>	55
3.5.2 – Filtro Activo e Carga Linear Trifásica Equilibrada – <i>configuração b</i>	57
3.5.3 – Filtro Activo e Carga Linear Trifásica Desequilibrada – <i>configuração a</i>	58
3.5.4 – Filtro Activo e Carga Linear Trifásica Desequilibrada – <i>configuração b</i>	58
3.5.5 – Filtro e Carga Linear Desequilibrada em Triângulo – <i>configuração a</i>	59
3.5.6 – Filtro e Carga Linear Desequilibrada em Triângulo – <i>configuração b</i>	60

3.5.7 – Filtro e Carga Não Linear Desequilibrada em Triângulo – <i>configuração a</i>	61
3.5.8 – Filtro e Carga Não Linear Desequilibrada em Triângulo – <i>configuração b</i>	62
3.6 – Limitações do Modelo do Filtro Activo Série Utilizado.....	63
3.6.1 – Efeito do Desequilíbrio dos Harmónicos das Tensões de Entrada.....	63
3.6.2 – Efeito do Desequilíbrio das Componentes Fundamentais das Tensões.....	64
3.6.3 – Efeito do Desequilíbrio da Fase das Tensões de Entrada.....	65
3.7 – Efeito do Atraso do Controlador.....	66
3.8 – Filtro Activo Série Monofásico com Controlador Clássico.....	69
3.8.1 – Algoritmo de um Controlador PID Digital.....	70
3.8.2 – Modelo do Filtro Activo Série Monofásico com Controlador PI.....	72
3.8.3 – Filtro Activo Série Monofásico com Controlo por Comparação.....	73
3.9 – Circuitos de Sincronização Robustos.....	78
3.9.1 – Circuito <i>Phase Locked Loop</i> – PLL.....	78
3.9.2 – Filtro Vectorial Adaptativo.....	79
3.9.3 – Variante de Frequência Fixa do Filtro Vectorial Adaptativo.....	83
3.9.4 – Variante Monofásica do Filtro Vectorial Adaptativo.....	84
3.9.5 – Comparação de Resultados do PLL e do Filtro Vectorial Adaptativo.....	85
3.10 – Conclusão.....	88
4 – Sistema de Aquisição e Controlo com Computador Pessoal.....	91
4.1 – Introdução.....	91
4.2 – <i>Hardware</i> Utilizado no Sistema de Controlo.....	92
4.3 – Aquisição de Dados com Computador Pessoal.....	95
4.4 – Sistema de Comando Baseado em <i>Microsoft Windows</i> e <i>LabVIEW</i>	99
4.4.1 – Introdução aos VIs Ponto Por Ponto (<i>PtByPt</i>).....	100
4.4.2 – Cálculos da Teoria p-q em <i>LabVIEW</i>	102
4.4.3 – Entrada/Saída Simples de Dados.....	103
4.4.4 – Controlador Clássico.....	104
4.5 – <i>Microsoft Windows</i> e Controlador de Dispositivo do Fabricante.....	105
4.5.1 – Alteração da Prioridade da Aplicação.....	105
4.5.2 – Cálculos da Teoria p-q.....	106
4.5.3 – Activação das Saídas Analógicas.....	108
4.6 – <i>Microsoft Windows</i> com Novo Controlador de Dispositivo.....	108
4.6.1 – WDM – <i>Windows Driver Model</i>	110
4.6.2 – Estrutura do WDM.....	113
4.6.3 – Modelo de Entrada/Saída do <i>Windows</i>	117
4.6.4 – Processamento de Entrada/Saída Síncrona.....	118
4.6.5 – Função <i>DriverEntry</i> ().....	119
4.6.6 – Função <i>AddDevice</i> ().....	120
4.6.7 – Função <i>StartDevice</i> ().....	121

4.7 – Controlo em Tempo Real com <i>Linux RT, Comedi e Comedilib</i>	121
4.7.1 – <i>RTAI – Realtime Application Interface</i>	123
4.7.2 – <i>Comedi – Control and Measurement Interface</i>	124
4.7.3 – Programas de Controlo dos Filtros Série e Paralelo.....	126
4.7.4 – Solução Adoptada.....	126
4.8 – Conclusão.....	127
 5 – Implementação de um Filtro Activo de Potência.....	 131
5.1 – Introdução.....	131
5.2 – Diagrama de Blocos do Filtro Série.....	131
5.3 – Circuito de <i>Drive</i> do Inversor.....	134
5.4 – Implementação de Circuito Modulador para Comando dos IGBT's.....	135
5.4.1 – Modulador para Filtro Activo Série Trifásico.....	136
5.4.2 – Modulador para Filtro Activo Série Monofásico.....	137
5.5 – Circuitos de Medição de Tensões e Correntes.....	138
5.5.1 – Medição de Tensões e Correntes para Filtro Activo Trifásico.....	138
5.5.2 – Medição de Tensões para Filtro Activo Monofásico.....	139
5.6 – Circuito para Emulação da Rede Eléctrica.....	141
5.7 – Filtro Vectorial Adaptativo Digital.....	142
5.7.1 – Discretização das Equações do Filtro Vectorial Adaptativo.....	142
5.7.2 – Análise do Efeito dos Erros de Arredondamento no Filtro Vectorial.....	146
5.8 – Filtro Activo Paralelo para Sistemas Trifásicos com Neutro.....	152
5.8.1 – Aquisição de Dados.....	152
5.8.2 – O DSP TMS320LF2407A.....	153
5.9 – Conclusão.....	156
 6 – Resultados Experimentais.....	 157
6.1 – Introdução.....	157
6.2 – Sistema de Controlo em <i>Microsoft Windows</i> e <i>LabVIEW</i>	157
6.3 – Sistema de Controlo em <i>Microsoft Windows</i> com <i>Driver</i> do Fabricante.....	161
6.4 – Sistema de Controlo em <i>Microsoft Windows</i> e Novo <i>Driver</i>	162
6.5 – Sistema de Controlo em <i>Linux</i> Tempo Real com <i>Comedi</i> e <i>Comedilib</i>	162
6.6 – Resultados Obtidos com um Microcontrolador.....	164
6.7 – Distorção da Tensão Devida a Rectificador com Filtro Capacitivo.....	165
6.8 – Compensação da Distorção da Tensão com Filtro Activo Série.....	166
6.8.1 – Testes com Sinal de Referência Extraída da Rede.....	167
6.8.2 – Teste com Sinal de Referência Gerado pelo Computador.....	169
6.9 – Conclusão.....	172
 7 – Conclusões e Trabalho Futuro.....	 175

7.1 – Conclusões.....	175
7.2 – Trabalho Futuro.....	178
Referências Bibliográficas.....	179
Simbologia.....	189
Unidades.....	189
Glossário.....	191
Anexos.....	A-1
A – Fonte de Alimentação.....	A-3
B – Circuito de <i>Drive</i>	A-5
C – Circuito Modulador de Largura de Impulso.....	A-9
D – Circuito de Medida de Tensões e Correntes, Tempo Morto e Sincronismo.....	A-11
E – Circuito para Emulação das Quedas de Tensão Distorcidas nas Linhas da Rede Eléctrica.....	A-15
F – Inversor de Tensão Controlado por Corrente e Frequência de Comutação Fixa.....	A-17
G – Análise das Potências da Teoria p-q.....	A-21
H – Análise de Sistemas Trifásicos com Características Particulares.....	A-35
I – Funções do <i>NI-DAQ</i> mais Interessantes para a Aplicação.....	A-39
J – Programas.....	A-61
J.1 – Diagramas de Blocos Desenvolvidos em <i>LabVIEW</i>	A-63
J.2 – Funções Principais do Novo <i>Driver</i> Desenvolvido para <i>Windows</i>	A-65
J.3 – Listagem do Programa <i>pqserie.cpp</i>	A-69
J.4 – Listagem do Programa <i>pqshunt.cpp</i>	A-76
J.5 – Listagem do Programa <i>potserie.c</i>	A-83
J.6 – Listagem do Programa <i>potshunt.c</i>	A-89
J.7 – Listagem do Programa <i>pot.c</i>	A-95
J.8 – Listagem do Programa <i>pot.h</i>	A-101
L – Fotos da Bancada de Trabalho.....	A-103